·论著·

同期训练可改善伴有超重或肥胖 2 型糖尿病患者的健康效应：一项 Meta 分析

卢冬磊[1]，杨风英[2]，冯展鹏[1]，曹立全[1*]，谭思洁[1*]

1.301617 天津市，天津体育学院 天津市体卫融合与健康促进重点实验室
2.250102 山东省济南市，山东体育学院运动与健康学院
[*]通信作者：曹立全，高级实验师；E-mail：caoliquan@tjus.edu.cn
谭思洁，教授 / 博士生导师；E-mail：tansijie2003@126.com

【摘要】 **背景** 伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病是一种日益严重的全球公共卫生问题，患者常伴有胰岛素抵抗、代谢异常及慢性炎症。尽管运动干预被广泛认为能改善这些状况，但同期有氧与抗阻训练对伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者的具体效果及其机制尚存在争议。**目的** 通过 Meta 分析评估同期训练对伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者身体成分、心肺适能、糖脂代谢、炎症因子指标的效果，为该类患者人群非药物无创疗法的制定提供参考。**方法** 检索 PubMed、Web of science、Ebsco、Embase、中国知网、维普、万方数据库、中国生物医学文献数据库，检索同期训练运动对伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者身体成分、心肺耐力、脂质代谢、糖尿病相关代谢标志物、炎症因子相关指标干预效果的随机对照试验，检索时间范围为 2001 年 1 月—2024 年 3 月。基于 Cochrane 风险偏倚评估工具评估纳入文献质量，Meta 分析由 Stata16.0 软件完成。**结果** 共纳入 12 项随机对照试验，包括 967 例伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者。Meta 分析结果显示，与对照组相比，同期训练运动干预组身体成分［BMI：WMD=-0.46，P<0.001；体脂百分比（BF%）：WMD=-3.49，P<0.001；去脂体重（FFM%）：WMD=3.26，P<0.001；腰围（WC）：WMD=-2.73，P<0.001；臀围（HC）：WMD=-2.78，P<0.001］、心肺耐力［最大摄氧量（VO_{2max}）：WMD=3.85，P<0.001］、脂质代谢［三酰甘油（TG）：SMD=-1.48，P=0.007；总胆固醇（TC）：SMD=-1.66，P=0.002；高密度脂蛋白（HDL-C）：SMD=1.10，P=0.011；低密度脂蛋白（LDL-C）：SMD=-1.26，P=0.018）、糖尿病代谢标志物［糖化血红蛋白（HbA_{1c}）：WMD=-0.86，P<0.001；胰岛素抵抗稳态评估指数（HOMA-IR）：SMD=-0.97，P<0.004；血糖（Glucose）：SMD=-1.32，P=0.014］、炎症标记物［肿瘤坏死因子（TNF-α）：SMD=-1.98，P<0.001］显著改善。**结论** 同期训练可显著改善伴有超重或肥胖 2 型糖尿病患者体质健康相关结局指标，包括 BMI、BF%、FFM%、WC、HC、VO_{2max}、TG、TC、HDL-C、LDL-C、HbA_{1c}、HOMA-IR、TNF-α，但对 IL-6 并无明显改善作用，具体干预效果受训练总量及训练顺序影响。

【关键词】 同期训练；糖尿病；肥胖；体成分；心肺耐力；脂质代谢；炎症
【中图分类号】 R 589.25 R 459.9 【文献标识码】 A DOI：10.12114/j.issn.1007-9572.2024.0211

Conccurent Training Can Improve the Physical Health in Diabesity Individuals：a Meta-Analysis

LU Donglei[1]，*YANG Fengying*[2]，*FENG Zhanpeng*[1]，*CAO Liquan*[1*]，*TAN Sijie*[1*]
*1.*Tianjin Key Lab for Sports，Health Integration & Promotion，Tianjin 301617，China
2.College of Sports and Health，Shandong Sport University，Jinan 250102，China
[*]*Corresponding authors：CAO Liquan，Senior Laboratory Master；E-mail：13920960993@163.com*
TAN Sijie，Professor/Doctoral supervisor；E-mail：tansijie2003@126.com

【Abstract】 **Background** Obesity and type 2 diabetes，both associated with chronic metabolic dysfunction，are characterized by insulin resistance and heightened cardiovascular risk. Concurrent training emerges as an effective intervention

基金项目：国家重点研发计划（2020YFC2006704）；天津市教委科研计划重点项目（2020ZD07）
引用本文：卢冬磊，杨风英，冯展鹏，等．同期训练可改善伴有超重或肥胖 2 型糖尿病患者的健康效应：一项 Meta 分析［J］．中国全科医学，2024.［Epub ahead of print］. DOI：10.12114/j.issn.1007-9572.2024.0211.［www.chinagp.net］
LU D L，YANG F Y，FENG Z P，et al. Conccurent training can improve the physical health in diabesity individuals：a Meta-analysis［J］. Chinese General Practice，2024.［Epub ahead of print］.

to improve physical health in these patients, though the specific impacts warrant further exploration.**Objective** This study systematically evaluates the impact of concurrent training on body composition and other health metrics in obese type 2 diabetic patients. **Methods** We reviewed randomized controlled trials from databases like PubMed, Web of Science, Ebsco, CNKI, VIP, and Wanfang, focusing on trials conducted between January 2001 and March 2024. These trials measured the effects of concurrent training on various health outcomes. Quality assessments were performed using the Cochrane risk of bias tool, and data were analyzed using Stata 16.0. **Results** Twelve trials involving 967 participants showed that concurrent training significantly improves body composition (BMI: WMD=−0.46, P<0.001; BF%: WMD=−3.49, P<0.0001; FFM%: WMD=3.26, P<0.001; WC: WMD=−2.73, P<0.0001; HC: WMD=−2.78, P<0.001), cardiorespiratory fitness (VO_{2max}: WMD=5.13, P<0.0001), and metabolic profiles (TG: SMD=−1.48, P=0.007; TC: SMD=−1.66, P=0.002; HDL-C: SMD=1.10, P=0.011; LDL-C: SMD=−1.26, P=0.018; HbA_{1c}: WMD=−0.86, P<0.001; HOMA-IR: SMD=−0.97, P=0.004; Glucose: SMD=−1.32, P=0.014), and inflammation markers (TNF-α: SMD=−1.98, P<0.001). **Conclusion** Concurrent training markedly improves key health outcomes in obese type 2 diabetes patients. However, its effects on IL-6 levels are negligible, and outcomes vary based on the volume and order of training sessions.

【Key words】 Concurrent training; Diabetes; Obesity; Body composition; Cardiorespiratory fitness; Lipid metabolism; Inflammation

伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病是一种肥胖和 2 型糖尿病并存的慢性代谢性疾病，其特征包括胰岛素抵抗、代谢异常、慢性炎症和氧化应激等[1]。随着经济水平提高及生活方式的改变，伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患病率不断攀升，已成为全球公共卫生问题[2]。罹患伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病不仅导致心肺功能下降[3]，还易引发动脉粥样硬化[4]、高血压[5]等疾病，并与较高死亡率相关[6]，给社会及卫生系统构成沉重负担。运动干预是伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病综合管理的关键，已被证实能有效改善血糖控制、减轻体重和降低心血管风险[7-8]。运动干预通过增强脂肪组织和骨骼肌的胰岛素受体亲和力[9-10]、抑制炎症细胞渗入脂肪组织[11]、提高心肺适能等机制[12]，有效调节血糖、改善体成分和脂质代谢。有氧训练提高心肺适能，抗阻训练对骨骼肌改善显著，两者结合对血脂改善效果最佳[13]，但由于训练计划复杂，患者依从性低，难以长期坚持，影响治疗效果[14]。同期训练是一种将有氧运动和抗阻训练结合在同一训练会话中的新型运动模式[15]。研究表明，同期训练能够充分利用有氧和抗阻运动的各自优势，显著改善伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者的代谢标志物、体成分、血脂水平、炎症状态和心肺适应性[14]。然而，关于同期训练在伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病管理中的具体效果及其作用机制，现有研究仍存在争议，且研究结果不一。鉴于此，本研究旨在通过系统评价和元分析的方法，综合评估同期训练对伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者健康指标的影响，深入探讨同期训练在伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病管理中的作用及其潜在的生物机制，旨在为伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者提供更有效、安全的综合管理干预方式提供更为科学的依据。

1 资料与方法

本研究 PROSPERO 注册号：CRD42024539376。

1.1 文献检索策略

本文遵循系统综述和 Meta 分析的首选报告项原则（PRISMA）[16]，计算机检索中国知网、维普信息资源平台、万方数据知识服务平台、中国生物医学文献数据库、PubMed、Embase、Web of Science 和 Ebsco 数据库。检索时间范围定为 2000 年 1 月 1 日—2024 年 3 月 1 日。英文检索词主要围绕同期训练及伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病的相关术语，包括："Concurrent Exercise Training, Combined Training, Aerobic and Resistance Training, Type 2 Diabetes Mellitus, Obesity, Overweight, Diabesity, Glycemic, Insulin Resistance, Body Composition, Cardiopulmonary Function, Cardiopulmonary Fitness, Maximum Oxygen Uptake, Lipid Profile, Inflammation"。中文检索词则包括："同期运动训练、结合训练、有氧与抗阻训练、2 型糖尿病、肥胖、超重、伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病、血糖、胰岛素抵抗、体成分、心肺功能、心肺适能、最大摄氧量、脂质代谢、炎症反应"。本文还追溯纳入研究所引用的参考文献，从而获取更多相关文献资料，以确保文献检索的全面性。

1.2 文献纳入与排除标准

1.2.1 文献纳入标准。（1）研究类型：随机对照临床试验；（2）研究对象：伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者。在研究开始前的 12 个月内，参与者均未有药物滥用史。（3）干预措施：对照组采用非干预措施、常规管理或

健康教育等形式；实验组在对照组基础上，对2型糖尿病患者实施同期训练，包括同一会话中有氧运动和抗阻训练的结合；（4）结局指标：评估指标包括身体成分[BMI、体脂百分比（BF%）、去脂体重百分比（FFM%）、腰围（WC）、臀围（HC）]，心肺适能（最大摄氧量，VO_{2max}），脂质代谢（三酰甘油（TG）、总胆固醇（TC）、高密度脂蛋白胆固醇（HDL-C）、低密度脂蛋白胆固醇（LDL-C）]，糖尿病主要代谢标志物[糖化血红蛋白，HbA_{1c}）、稳态模型评估胰岛素抵抗指数（HOMA-IR）、血糖（Glucose）]，以及炎症标记物（白细胞介素-6（IL-6）、肿瘤坏死因子-α（TNF-α））指标，以全面评估同期训练对伴有超重或肥胖的2型糖尿病患者体质健康的影响。

1.2.2　文献排除标准：动物实验、系统综述、Meta分析、会议论文、综述、与本文主题不相符的研究、非随机对照试验，以及质量较低或结果重复发表的文章。

1.3　数据提取

初筛阶段：将检索到的文献导入EndNote20文献管理软件，剔除重复记录，通过筛选标题和摘要来确定潜在符合条件的文献。数据库的检索和数据提取由2名研究人员独立完成，如有分歧则由第3名审查人员参与与判定。

纳入文献提取信息如下：第一作者姓名、发表年份、实验设计、样本量、干预措施、干预频率、干预周期以及体成分、心肺适能血脂水平、代谢标志物、炎症指标、结局指标。

对于纳入文献中未明确给出各结局指标的标准差，按以下公式计算[17]：

$$\sqrt{SD^2_{pre}+SD^2_{post}-2\times Corr(pre,post)\times SD_{pre}\times SD_{post}}$$

SD_{pre} 和 SD_{post} 分别为干预前的标准差与干预后的标准差，Corr（pre，post）为受试者内相关系数。若未报告相关性，则假设受试者内相关性为0.5。

1.4　文献质量评估

由2名研究员采用修订后的Cochrane风险偏倚评估工具（RoB2）对纳入文献进行风险评估判定，并对偏倚风险进行了总体评估（高、低、不清楚）。根据RoB2，偏倚风险的评估包括随机分配方法、分配方案的隐藏、受试者与实施者以及数据分析者是否做到盲法、数据结果完整性、有无选择性报告研究结果、其他风险来源。若2名研究人员评估结果存在歧义，则由第3名研究人员参与判定。

1.5　证据质量评估

由2名研究员采用Cochrane风险偏倚评估工具从7个维度对纳入的16篇文献进行偏倚风险评价。鉴于研究涉及的运动干预特性，研究者需要向实验组参与者详细传达干预方案的内容、目的、潜在风险以及相关注意事项，并确保收集书面知情同意，实现双盲设置并不可行，因此在双盲性评价上纳入研究均被记为“不清楚”。若2名研究人员评估结果不一致，则由第3名研究人员参与判定。

1.6　统计学分析

Meta分析使用Stata16.0软件进行。结局指标的数据均为连续性变量，当测量工具和单位一致时，使用加权均值差（WMD）；否则，采用标准化均数差（SMD）以消除量纲，95%*CI*作为效应量指标。结果的异质性通过*P*值和I^2值进行检验：*P*值>0.1且I^2<50%时，认为异质性较小，使用固定效应模型；P值≤0.1且I^2≥50%时，认为异质性较大，采用随机效应模型，并进行亚组分析或敏感性分析以观察异质性变化。P值小于0.05被定义为具有显著性统计学差异。当纳入文献样本量少于10时，由于样本量过少和检验效能过低，发表偏倚检验未被进行。

2　结果

2.1　文献检索结果

初步检索获得6 327篇文献，经逐层筛选，最终纳入12篇随机对照试验[18-29]，文献筛选流程图见图1。

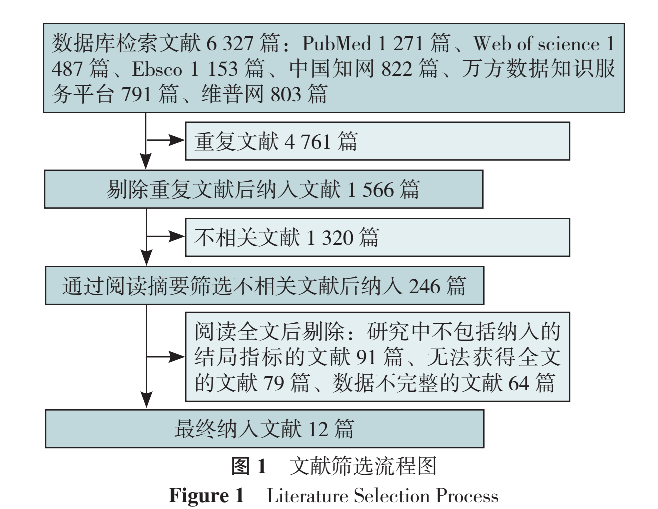


图1　文献筛选流程图

Figure 1　Literature Selection Process

2.2　纳入文献的基本特征和偏倚风险评价结果

纳入研究的基本特征见表1，纳入研究的偏倚风险评价结果见附件见表2。

2.4　Meta分析结果

2.4.1　同期训练对伴有超重或肥胖的2型糖尿病患者体成分的影响。（1）BMI：包含BMI结局指标的研究共11项[18-27, 29]，936例受试者。各研究间异质性较低（I^2=39.8%），采用固定效应模型进行Meta分析，结果显示，同期训练干预组BMI得到显著改善（*WMD*=-0.46，95%*CI*=-0.50~-0.42，*P*<0.001），见表3。

（2）BF%：包含BF%结局指标的研究共7项[18-



表 1 纳入研究基本信息特征

Table 1 Basic information characteristics of included studies

第一作者	时间（年）	患者类型	例数（T/C）	年龄（T/C，岁）	干预组	对照组	结局指标
AMINILARI[18]	2017	伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病	28（13/15）	45~60	12 周，3 次 / 周，45 min/ 次，有氧训练方式在功率自行车上进行，强度为 50%~55%1HRmax，每两周增加 5%，抗阻训练方式为每组做 3 组 ×8 次重复的力量训练，包括腿部伸展、俯卧腿弯曲、卷腹、肱二头肌、肱三头肌和坐姿小腿训练，抗阻训练强度为 50%~55% 1RM，每两周增加 5%	遵从常规糖尿病护理建议，无特定运动计划	①②⑭
ANNIBALINI[19]	2017	伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病	16（8/8）	（57±9.1）/（60±6.8）	16 周，3 次 / 周，有氧与抗阻训练在统一训练课中完成，有氧训练在跑步机上进行，强度 40%~65% 1HRmax，单次干预时长从 30min 逐渐增加到 60 min；抗阻训练方式包括使用卧式腿推、下拉、背部训练器械和胸推器械进行的力量训练。训练起始，受试者在每台等速训练设备进行 2 组，每组 20 次重复，并逐渐增加至 4 组，每组 12 次重复，负重范围从最大一次重复（1-RM）的 40% 逐步增加至 60%。力量训练的进展遵循渐进超负荷原则，具体实施方法为每四周增加 10%1-RM 的负荷，与每八周增加 1 组训练次数交替进行	遵从常规糖尿病护理建议，无特定运动计划	①②③④⑤⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑮
BALDUCCI[20]	2010	伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病	606（303/303）	（58.8±8.5）/（58.8±8.6）	48 周，2 次 / 周，75 min/ 次，有氧训练使用跑步机、台阶、椭圆机、手臂或自行车测功计进行，运动负荷根据最大氧气消耗量（VO_{2max}）的百分比计算。阻力训练包括胸部推举、正面牵拉、深蹲、腹肌训练和三种伸展运动。阻力训练的强度根据 VO_{2max} 和单次重复最大值（1-RM）的提高进行调整	遵从常规糖尿病护理建议，无特定运动计划	①④⑥⑦⑧⑨⑬⑭⑮
BANITALEBI[21]	2019	伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病	28（14/14）	（54.14±5.43）/（55.71±6.40）	10 周，3 次 / 周，50 min/ 次，有氧训练与抗阻训练在同一训练课中完成。有氧训练在跑步机或功率自行车上进行，有氧训练强度为第 1~2 周为 50%HRmax，第 3~10 周逐渐增加至 70%，使用 Polar T31 心率监测器（芬兰 Kempele 公司）调整工作负荷以达到目标心率。训练负荷根据个体情况逐步增加；而抗阻训练使用健身器械（DynaForce，德国）进行，训练内容包括：双腿腿举、高位下拉、卧推、肱二头肌弯举，肱三头肌推举，第 1~2 周：每次训练 1 组，每组 15 次最大重复次数（15-RM），组间休息 2~3 min。第 3~4 周：每次训练 2 组，每组 15 次最大重复次数（15-RM），组间休息 2~3 min。第 5~6 周：每次训练 3 组，每组 12 次最大重复次数（12-RM），组间休息 2~3 min。第 7~8 周：每次训练 3 组，每组 12 次最大重复次数（12-RM），组间休息 2~3 min。第 9~10 周：每次训练 3 组，每组 10 次最大重复次数（10-RM），组间休息 2~3 min		①②⑩⑫⑬⑭
BASSI[22]	2016	伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病	41（21/20）	（49.5±6.1）/（52.1±7.3）	12 周，3 次 / 周，70 min/ 次（包括 5 min 热身，5 min 拉伸放松，60 min 训练），有氧与抗阻训练在同一训练课中。有氧训练采用功率自行车进行训练，有氧训练强度达到峰值氧耗（VO_2 peak）的 60%~70%。具体方法是以恒定速度（60 r/min）骑行，工作负荷在 30min 内逐渐增加；抗阻训练借助健身器械完成，训练内容包括上肢训练（肱二头肌弯举、坐姿划船、肱三头肌推举、卧推）和下肢训练（腿举、小腿肌群训练、腿屈伸）抗阻训练强度为 60%~80% 1RM，每个动作进行 3 组，每组 10~12 次重复，随着训练的进行，通过逐渐增加负重量以保持每组 10~12 次重复的难度	保持原久坐生活方式，无特定运动计划	①④⑤⑫⑬⑭
KADOGLOU[23]	2012	伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病	46（22/24）	（57.9±6.5）/（57.9±7.2）	24 周，4 次 / 周，60 min/ 次（包括 10 min 热身，5 min 拉伸，45 min 训练），四次运动包括一次有氧运动、一次抗阻运动、两次同期训练。有氧训练借助跑步机、自行车、有氧操完成，有氧训练强度渐进增加至 60%~75% 1HRmax；抗阻训练通过健身训练器械完成，训练内容包括腿举、腿曲、卧推、高位下拉、肱二头肌弯举、肱三头肌推举抗阻训练强度为 60%~80% 1RM	鼓励进行 150 min/ 周的自我调节的休闲体育活动，运动强度为低到中等	①②⑥⑦⑧⑨⑫⑬⑭⑮
LEE[24]	2011	伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病	35（23/12）	（50.39±7.61）/（48.50±7.94）	6 周，3 次 / 周，70~85 min，有氧训练与抗阻训练在同一训练课中。有氧训练方式通过健步走完成，有氧训练的单次干预时长从 30 min 增加到 40 min，运动强度为 50%~70%VO_{2max}；抗阻训练借助健身训练器械完成，训练内容包括深蹲、哑铃卧推、硬拉等，训练强度为 50% 1RM	遵从常规糖尿病护理建议，无特定运动计划	①④⑥⑦⑧⑨⑬⑭⑮
LEEHEY[25]	2016	伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病合并慢性肾脏病患者	32（14/18）	（65.4±8.7）/（66.6±7.5）	52 周的结构化运动干预。此干预由 12 周中心监督锻炼及随后的 40 周家庭锻炼构成。初期，参与者每周完成三次锻炼，包括 60 min 有氧运动和 20~30 min 抗阻力训练。家庭锻炼阶段，患者以每周 3 次 60 min 或每天 30 min 六次的频率自主锻炼，并通过每周的电话指导及每月的面对面指导与训练师保持交流，以确保锻炼的连续性和效果。	保持原习惯生活方式，无特定运动计划	①②⑥⑦⑧⑨
RAD（A）[26]	2023	伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病	30（13/17）	（43.9±2.5）/（44.7±3.0）	12 周，3 次 / 周，约 60 min/ 次，有氧训练与抗阻训练在同一训练课中。有氧训练通过跑步、健步走方式完成，有氧训练强度为使用高强度间隔训练，10 次 1 min，强度为 75%~95% HRmax，间隔期间的活动休息强度为 40%~60% HRmax；抗阻训练借助抗阻训练器械完成，训练内容包括上肢训练（卧推、高位下拉、肩推）和下肢训练（深蹲、腿举、腿曲），强度为第 1~3 周：3 组，每组 15~18 次，强度为 40%~50% 1RM。第 4~6 周：3 组，每组 12~15 次，强度为 50%~60%1RM。第 7~9 周：3 组，每组 10~12 次，强度为 60%~70% 1RM。第 10~12 周：3 组，每组 8~10 次，强度为 70%~80% 1RM		①②③⑫⑬⑭

（续表 1）

第一作者	时间（年）	患者类型	例数（T/C）	年龄（T/C，岁）	干预组	对照组	结局指标
RAD（B）[26]	2023	伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病	32（15/17）	（44.0±2.6）/（44.7±3.0）	12 周，3 次 / 周，约 60 min/ 次，有氧训练与抗阻训练在同一训练课中。有氧训练通过跑步、健步走方式完成，有氧训练强度为使用高强度间隔训练，10 次 1 min，强度为 75%~95% HRmax，间隔期间的活动休息强度为 40%~60% HRmax；抗阻训练借助抗阻训练器械完成，训练内容包括上肢训练（卧推、高位下拉、肩推）和下肢训练（深蹲、腿举、腿曲），强度为第 1~3 周：3 组，15~18 次 / 组，强度为 40%~50% 1RM。第 4~6 周：3 组，12~15 次 / 组，强度为 50%~60% 1RM。第 7~9 周：3 组，10~12 次 / 组，强度为 60%~70% 1RM。第 10~12 周：3 组，8~10 次 / 组，强度为 70%~80% 1RM		①②③⑫⑬⑭
SAEIDI[27]	2021	伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病	22（11/11）	（54.73±4.07）/（53.80±4.22）	12 周，3 次 / 周，55~75 min/ 次（包括 5min 热身，5min 拉伸放松，60min 训练），有氧训练与抗阻训练在同一训练课中。有氧训练借助跑步机完成训练强度为 60%~70%VO_{2max}，训练时长由最初的 10 min 增加至 30 min；抗阻训练借助抗阻训练器械完成，强度为 60%~70% 1RM，单次干预时长 45 min	遵从常规糖尿病护理建议，无特定运动计划	①②③⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑮
SILVEIRA[28]	2021	伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病	31（16/15）	（63.9±7.7）/（63.3±7.8）	8 周，3 次 / 周，45~60min/ 次，有氧训练与抗阻训练在同一训练课中。有氧训练借助健步走完成，训练强度为第 1~2 周：20 min，速度为 6 min 步行测试的 100%，第 3~4 周：20 min，速度为 6 min 步行测试的 105%，第 5~6 周：25 min，速度为 6 min 步行测试的 105%，第 7~8 周：25min，速度为 6min 步行测试的 105%~110%；而抗阻训练借助抗阻训练器械与自重完成，训练强度为第 1~2 周：2 组，13~15 次 1RM/ 组，休息间隔 60 s，第 3~4 周：3 组，13~15 次 1RM/ 组，休息间隔 60 s，第 5~6 周：3 组，10~12 次 1RM/ 组，休息间隔 60 s，第 7~8 周：3 组，8~10 次 1RM/ 组，休息间隔 60 s	保持原习惯生活方式，无特定运动计划	⑥⑦⑧⑨⑭⑮
VINETTI[29]	2015	伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病	20（10/10）	（60.56±5.94）/（57.50±9.46）	48 周，约 3 次 / 周，90 min/ 次，有氧训练和抗阻训练在同一训练课中。有氧训练借助功率自行车完成，强度为开始时约 5bpm 低于心率耗氧量阈。从第 3 个月开始，允许心率短暂超过心率耗氧量阈，在不超过通气补偿点的情况下，以间隔训练的方式逐渐增加。抗阻训练强度为涉及主要肌肉群的各种练习，包括徒手体操和使用脚踝重物、哑铃、弹力带的重复练习，从 3 组每组 8 次逐步增加到 12~15 次		①⑥⑦⑧⑬

注：① BMI，② BF%，③ FFM%，④ WC，⑤ HC，⑥ TG，⑦ TC，⑧ HDL-C，⑨ LDL-C，⑩ IL-6，⑪ TNF-α，⑫ VO_{2max}，⑬ HbA_{1c}，⑭ HOMA-IR，⑮ Glucose；T 为干预组，C 为对照组。

表 2 纳入文献质量评估结果

Table 2 Results of quality evaluation of included literature

第一作者	时间（年）	随机方法	分配隐藏	研究对象与研究者	结果评测者	结局指标数据完整性	选择性报告研究结果	其他偏倚来源
AMINILARI[18]	2017	低风险	不清楚	高风险	不清楚	低风险	低风险	不清楚
ANNIBALINI[19]	2017	低风险	不清楚	高风险	不清楚	低风险	低风险	不清楚
BALDUCCI[20]	2010	低风险	不清楚	高风险	不清楚	低风险	低风险	不清楚
BANITALEBI[21]	2019	低风险	不清楚	高风险	不清楚	低风险	低风险	不清楚
BASSI[22]	2016	低风险	低风险	高风险	不清楚	低风险	低风险	不清楚
KADOGLOU[23]	2012	低风险	不清楚	高风险	不清楚	低风险	低风险	不清楚
LEE[24]	2011	低风险	不清楚	高风险	不清楚	低风险	低风险	不清楚
LEEHEY[25]	2016	低风险	不清楚	高风险	不清楚	低风险	低风险	不清楚
RAD（A）[26]	2023	低风险	不清楚	高风险	不清楚	低风险	低风险	不清楚
RAD（B）[26]	2023	低风险	不清楚	高风险	不清楚	低风险	低风险	不清楚
SAEIDI[27]	2021	低风险	不清楚	高风险	不清楚	低风险	低风险	不清楚
SILVEIRA[28]	2021	低风险	不清楚	高风险	不清楚	低风险	低风险	不清楚
VINETTI[29]	2015	低风险	不清楚	高风险	不清楚	低风险	低风险	不清楚

[19，21，23，25-27]，包含 234 例受试者，各研究间异质性较高（I^2=79.7%），采用随机效应模型进行 Meta 分析，结果显示，同期训练干预组 BF% 得到显著改善（*WMD*=-3.49，95%*CI*=-5.09~-1.89，*P*<0.0001），见表 3。敏感性分析显示，有 1 项研究[23]存在异质性，剔除后异质性降至 29.6%，效应量增加（*WMD*=-4.20，95%*CI*=-5.43~-2.98，*P*<0.001）。

（3）FFM%：包含 FFM% 结局指标的研究共 3 项[19，26，27]，包含 100 例受试者，各研究间异质性较低（I^2=0%），采用固定效应模型进行 Meta 分析，结果显示，同期训练干预组 FFM% 得到显著改善（*WMD*=3.26，95%*CI*=2.00~4.52，*P*<0.001），见表 3。



表 3　亚组分析结果

Table 3　Subgroup Analysis Results

指标	影响因素	分组	纳入文献	效应模型	WMD 或 SMD 值（95%*CI*）	*P* 值	I^2（%）	*P* 值异质性
BMI				固定	WMD=-0.46（-0.50~-0.02）	<0.001	39.80	0.076
	运动总量	<240 min/ 周	7[18，20-22，25-27]		WMD=-1.02（-1.43~-0.61）	<0.001	29.00	0.197
		≥ 240 min/ 周	4[19，23-24，29]		WMD=-0.45（-0.50~-0.41）	<0.001	0	0.784
	有氧和抗阻训练干预先后顺序	先有氧后抗阻	6[18，19，21，23，26，29]		WMD=-0.45（-0.49~-0.41）	<0.001	0	0.978
		先抗阻后有氧	6[20，22，24-27]		WMD=-0.82（-1.11~-0.53）	<0.001	55.90	0.045
BF%				随机	WMD=-3.49（-5.09~-1.89）	<0.001	79.70	<0.001
	运动总量	<240 min/ 周	5[18，21，25-27]		WMD=-4.29（-5.60~-2.97）	<0.001	36.00	0.167
		≥ 240 min/ 周	2[19，23]		WMD=-1.85（-2.08~-1.62）	<0.001	0	0.739
	有氧和抗阻训练干预先后顺序	先有氧后抗阻	5[18，19，21，23，26]		WMD=-2.95（-4.70~-1.21）	0.001	68.30	0.013
		先抗阻后有氧	3[25-27]		WMD=-4.70（-6.47~-2.93）	<0.001	33.40	0.223
FFM%				固定	WMD=3.26（2.00~4.52）	<0.001	0	0.780
	运动总量	<240 min/ 周	2[26-27]		WMD=3.40（2.11~4.70）	<0.001	0	0.977
		≥ 240 min/ 周	1[19]		WMD=0.30（-5.52~6.12）	0.920		
	有氧和抗阻训练干预先后顺序	先有氧后抗阻	2[19，26]		WMD=2.77（-0.02~5.55）	0.052	0	0.344
		先抗阻后有氧	2[26-27]		WMD=3.38（1.97~4.80）	<0.001	0	0.839
WC				固定	WMD=-2.73（-3.96~-1.50）	<0.001	0	0.600
	运动总量	<240 min/ 周	2[20，22]		WMD=-3.95（-5.35~-1.84）	<0.001	0	0.963
		≥ 240 min/ 周	2[19，24]		WMD=-1.90（-3.62~-0.17）	0.031	0	0.828
	有氧和抗阻训练干预先后顺序	先有氧后抗阻	1[19]		WMD=-2.90（-12.10~6.30）	0.537		
		先抗阻后有氧	3[20，22，24]		WMD=-2.73（-3.97~-1.48）	<0.001	0	0.393
HC				固定	WMD=-2.78（-6.79~1.23）	0.174	0	0.923
	运动总量	<240 min/ 周	1[22]		WMD=-3.00（-8.97~2.97）	0.325		
		≥ 240 min/ 周	1[19]		WMD=-2.60（-8.02~2.82）	0.347		
	有氧和抗阻训练干预先后顺序	先有氧后抗阻	1[19]		WMD=-2.60（-8.02~2.82）	0.347		
		先抗阻后有氧	1[22]		WMD=-3.00（-8.97~2.97）	0.325		
VO_{2max}				随机	WMD=3.85（2.34~5.36）	<0.001	78.50	<0.001
	运动总量	<240 min/ 周	4[21，22，26-27]		WMD=3.38（1.63~5.13）	<0.001	71.20	0.008
		≥ 240 min/ 周	2[19，23]		WMD=5.13（4.55~5.72）	<0.001	0	0.866
	有氧和抗阻训练干预先后顺序	先有氧后抗阻	4[19，21，23，26]		WMD=3.69（1.53~5.84）	0.001	75.10	0.007
		先抗阻后有氧	3[22，26，27]		WMD=4.08（1.27~6.88）	0.004	83.40	0.002
TG				随机	*SMD*=-1.48（-2.55~-0.41）	0.007	94.50	<0.001
	运动总量	<240 min/ 周	4[20，25，27，28]		*SMD*=-0.42（-1.24~0.40）	0.312	86.30	<0.001
		≥ 240 min/ 周	3[23，24，29]		*SMD*=-3.07（-6.04~-0.11）	0.042	95.90	<0.001
	有氧和抗阻训练干预先后顺序	先有氧后抗阻	2[23，29]		*SMD*=-4.13（-10.36~2.09）	0.193	97.70	<0.001
		先抗阻后有氧	4[20，24-25，27]		*SMD*=-0.73（-1.72~0.25）	0.144	90.10	<0.001
TC				随机	*SMD*=-1.66（-2.72~-0.61）	0.002	94.20	<0.001
	运动总量	<240 min/ 周	4[20，25，27，28]		*SMD*=-0.91（-2.20~0.38）	0.165	92.90	<0.001
		≥ 240 min/ 周	4[19，23-24，29]		*SMD*=-2.27（-4.39~-0.14）	0.036	94.50	<0.001
	有氧和抗阻训练干预先后顺序	先有氧后抗阻	3[19，23，29]		*SMD*=-2.88（-6.08~0.33）	0.078	95.80	<0.001
		先抗阻后有氧	4[20，24，25，27]		*SMD*=-1.12（-2.44~0.20）	0.097	93.20	<0.001
HDL-C				随机	*SMD*=1.10（0.25~1.95）	0.011	92.20	<0.001
	运动总量	<240 min/ 周	4[20，25，27，28]		*SMD*=0.88（-0.11~1.87）	0.082	89.60	<0.001
		≥ 240 min/ 周	4[19，23-24，29]		*SMD*=1.28（-0.73~3.28）	0.212	94.70	<0.001
	有氧和抗阻训练干预先后顺序	先有氧后抗阻	3[19，23，29]		*SMD*=1.68（-1.29~4.66）	0.267	96.10	<0.001
		先抗阻后有氧	4[20，24-25，27]		*SMD*=0.89（-0.10~1.87）	0.077	89.50	<0.001

（续表3）

指标	影响因素	分组	纳入文献	效应模型	WMD或SMD值（95%*CI*）	*P*值	I^2（%）	*P*值异质性
LDL-C				随机	*SMD*=-1.26（-2.31~-0.22）	0.018	94.10	<0.001
	运动总量	<240 min/周	4[20，25，27，28]		*SMD*=-0.67（-1.80~0.45）	0.241	91.80	<0.001
		≥240 min/周	3[19，23，24]		*SMD*=-2.05（-4.99~0.90）	0.173	96.30	<0.001
	有氧和抗阻训练干预先后顺序	先有氧后抗阻	2[19，23]		*SMD*=-2.94（-8.45~2.57）	0.296	97.70	<0.001
		先抗阻后有氧	4[20，24，25，27]		*SMD*=-0.81（-1.91~0.29）	0.149	91.50	<0.001
HbA_{1c}（%）				随机	WMD=-0.76（-1.06~-0.46）	<0.001	73.20	<0.001
	运动总量	<240 min/周	4[20-22，26]		WMD=-0.98（-1.60~-0.46）	0.002	79.90	<0.001
		≥240 min/周	4[19，23-24，29]		WMD=-0.70（-0.96~-0.44）	<0.001	27.40	0.247
	有氧和抗阻训练干预先后顺序	先有氧后抗阻	5[19，21，23，26，29]		WMD=-0.83（-1.01~-0.65）	<0.001	5.70	0.375
		先抗阻后有氧	4[20，22，24，26]		WMD=-0.77（-1.38~-0.17）	0.012	78.80	0.003
HOMA-IR				随机	*SMD*=-0.97（-1.62~-0.32）	0.004	90.50	<0.001
	运动总量	<240 min/周	6[18，20-22，26，28]		*SMD*=-0.39（-0.67~-0.12）	0.005	38.80	0.133
		≥240 min/周	2[23，24]		*SMD*=-4.11（-11.82~3.60）	0.296	98.50	<0.001
	有氧和抗阻训练干预先后顺序	先有氧后抗阻	4[18，21，23，26]		*SMD*=-2.33（-4.36~-0.30）	0.025	95.30	<0.001
		先抗阻后有氧	4[20，22，24，26]		*SMD*=-0.20（-0.44~0.03）	0.093	17.60	0.303
Glucose				随机	*SMD*=-1.32（-2.38~-0.27）	0.014	93.40	<0.001
	运动总量	<240 min/周	3[20，27，28]		*SMD*=-1.05（-2.53~0.43）	0.163	93.00	<0.001
		≥240 min/周	3[19，23，24]		*SMD*=-1.59（-2.80~-0.38）	0.010	82.90	0.003
	有氧和抗阻训练干预先后顺序	先有氧后抗阻	2[19，23]		*SMD*=-1.90（-3.70~-0.10）	0.038	86.10	0.007
		先抗阻后有氧	3[20，24，27]		*SMD*=-1.53（-3.19~0.14）	0.073	94.10	<0.001
IL-6				随机	*SMD*=-0.98（-1.98~0.02）	0.054	71.00	0.032
	运动总量	<240 min/周	2[21，27]		*SMD*=-0.99（-2.61~0.64）	0.235	85.10	0.010
		≥240 min/周	1[19]		*SMD*=-1.04（-2.10~0.01）	0.052		
	有氧和抗阻训练干预先后顺序	先有氧后抗阻	2[19，21]		*SMD*=-0.53（-1.35~0.28）	0.202	40.30%	<0.001
		先抗阻后有氧	1[27]		*SMD*=-1.85（-2.87~-0.84）	<0.001		
TNF-α				固定	*SMD*=-1.98（-2.78~-1.19）	<0.001	0	0.511
	运动总量	<240 min/周	1[27]		*SMD*=-2.23（-3.31~-1.15）	<0.001		
		≥240 min/周	1[19]		*SMD*=-1.70（-2.86~-0.53）	0.004		
	有氧和抗阻训练干预先后顺序	先有氧后抗阻	1[19]		*SMD*=-1.70（-2.86~-0.53）	0.004		
		先抗阻后有氧	1[27]		*SMD*=-2.23（-3.31~-1.15）	<0.001		

注：BF%=体脂百分比，FFM%=去脂体重百分比，WC=腰围，HC=臀围，VO_{2max}=最大摄氧量，TG=三酰甘油，TC=总胆固醇，HDL-C=高密度脂蛋白胆固醇，LDL-C=低密度脂蛋白胆固醇，HbA_{1c}=糖化血红蛋白，HOMA-IR=稳态模型评估胰岛素抵抗指数，Glucose=血糖，IL=白介素。

（4）WC：包含WC结局指标的研究共4项[19，20，22，24]，包含698例受试者，各研究间异质性较低（I^2=0%），采用固定效应模型进行Meta分析，结果显示，同期训练干预组WC得到显著改善（*WMD*=-2.73，95%*CI*=-3.96~-1.50，*P*<0.001），见表3。

（5）HC：包含HC结局指标的研究共2项[19，22]，包含57例受试者，各研究间异质性较低（I^2=0%），采用固定效应模型进行Meta分析，结果显示，同期训练干预组HC无显著性改善（*WMD*=-2.78，95%*CI*=-6.79~1.23，*P*=0.174），见表3。

2.4.2 同期训练对伴有超重或肥胖的2型糖尿病患者心肺适能的影响。包含VO_{2max}结局指标的研究共6项[19，21-23，26，27]，包含215例受试者，各研究间异质性较高（I^2=78.5%），采用随机效应模型进行Meta分析，结果显示，同期训练干预组VO_{2max}得到显著改善（*WMD*=3.85，95%*CI*=2.34~5.36，*P*<0.0001），见表3。敏感性分析显示，2项研究[26]存在异质性。将其剔除后，异质性降到了0%，效应量提高（*WMD*=5.13，95%*CI*=4.59~5.67，*P*<0.001）。

2.4.3 同期训练对伴有超重或肥胖的2型糖尿病患者血脂谱的影响。（1）TG：包含TG结局指标的研究共7项[20，23-25，27-29]，包含792例受试者，各研究间异质性较高（I^2=94.5%），采用随机效应模型进行Meta分析，结果显示，同期训练干预组TG得到显著改善（*SMD*=-1.48，95%*CI*=-2.55~-0.41，*P*=0.007），见表3。敏感性分析显示，有1项研究[23]存在异质性。将其剔除后，

异质性降到了 85.3%，效应量有所降低（*SMD*=-0.63，95%*CI*=-1.30~0.04，*P*=0.063）。

（2）TC：包含 TC 结局指标的研究共 8 项[19，20，23-25，27-29]，包含 808 例受试者，各研究间异质性较高（I^2=94.2%），采用随机效应模型进行 Meta 分析，结果显示，同期训练干预组 TC 得到显著改善（*SMD*=-1.66，95%*CI*=-2.72~-0.61，*P*=0.002），见表 3。敏感性分析显示，有 3 项研究[23，25，27]存在异质性。将其剔除后后，异质性降到了 40.6%，效应量有所降低（*SMD*=-0.38，95%*CI*=-0.73~-0.02，*P*=0.036）。

（3）HDL-C：包含 HDL-C 结局指标的研究共 8 项[19，20，23-25，27-29]，包含 808 例受试者，各研究间异质性较高（I^2=92.2%），采用随机效应模型进行 Meta 分析，结果显示，同期训练干预组 HDL-C 得到显著改善（*SMD*=1.10，95%*CI*=0.25~1.95，*P*=0.011），见表 3。敏感性分析发现，有 2 项研究[23，27]存在异质性。将其剔除后，异质性降到了 0%，效应量有所降低（*SMD*=0.29，95%*CI*=0.14~0.43，*P*<0.001）。

（4）LDL-C：包含 LDL-C 结局指标的研究共 7 项[19，20，23-25，27，28]788 例受试者，各研究间异质性较高（I^2=94.1%），采用随机效应模型进行 Meta 分析，结果显示，同期训练干预组得到显著性改善（*SMD*=-1.26，95%*CI*=-2.31~-0.22，*P*=0.018），见表 3。敏感性分析发现，有 2 项研究[23，27]存在异质性。将其剔除后，异质性降到了 57.5%，效应量有所降低，但同期训练干预组仍无显著性改善（*SMD*=-0.02，95%*CI*=-0.42~0.39，*P*=0.929）。

2.4.4 同期训练对伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者代谢标志物的影响。（1）HbA_{1c}：包含 HbA_{1c}% 结局指标的研究共 8 项[19-24，26，29]，包含 854 例受试者，各研究间异质性较高（I^2=73.2%），采用随机效应模型进行 Meta 分析，结果显示，同期训练干预组 HbA_{1c} 得到显著改善（*WMD*=-0.76，95%*CI*=-1.06~-0.46，*P*<0.0001），见表 3。敏感性分析发现，有 1 项研究[20]存在异质性。将其剔除后，异质性降到了 33.5%，效应量有所提高（*WMD*=-0.86，95%*CI*=-1.11~-0.61，*P*<0.001）。

（2）HOMA-IR：包含 HOMA-IR 结局指标的研究共 8 项[18，20-24，26，28]，包含 877 例受试者，各研究间异质性较高（I^2=90.5%），采用随机效应模型进行 Meta 分析，结果显示，同期训练干预组 HOMA-IR 得到显著改善（*SMD*=-0.97，95%*CI*=-1.62~-0.32，*P*<0.004），见表 3。敏感性分析发现，有 1 项研究[23]存在异质性。将其剔除后，异质性降到了 28.6%，效应量有所降低（*SMD*=-0.35，95%*CI*=-0.59~-0.11，*P*=0.004）。

（3）Glucose：包含 Glucose 结局指标的研究共 6 项[19-20，23，24，27，28]，包含 754 例受试者，各研究间异质性较高（I^2=93.4%），采用随机效应模型进行 Meta 分析，结果显示，干预组 Glucose 改善程度优于对照组，差异有统计学意义（*SMD*=-1.32，95%*CI*=-2.38~-0.27，*P*=0.014），见表 3。敏感性分析发现，有 2 项研究[20，28]存在异质性。将其剔除后，异质性降到了 86%，效应量有所提高（*SMD*=-2.14，95%*CI*=-3.45~-0.82，*P*=0.001）。

2.4.5 同期训练对伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者炎症标志物的影响

（1）IL-6：包含 IL-6 结局指标的研究共 3 项[19，21，27]，包含 66 例受试者，各研究间异质性较高（I^2=71%），采用随机效应模型进行 Meta 分析，结果显示，干预组 IL-6 得到显著改善（*SMD*=-0.98，95%*CI*=-1.98~0.02，*P*=0.054），见表 3。敏感性分析发现，有 1 项研究[21]存在异质性。将其剔除后，异质性降到了 15.3%，效应量有所提高，差异有统计学意义（*SMD*=-1.46，95%*CI*=-2.26~-0.67，*P*<0.001）。

（2）TNF-α：包含 TNF-α 结局指标的研究共 2 项[19，27]，包含 38 例受试者，各研究间异质性较低（I^2=0%），采用固定效应模型进行 Meta 分析，结果显示，干预组 TNF-α 得到显著改善（*SMD*=-1.98，95%*CI*=-2.78~-1.19，*P*<0.001），见表 3。

2.5 亚组分析

本研究分组依据运动总量（<240 min/ 周、≥ 240 min/ 周）和有氧和抗阻训练先后顺序（先有氧后抗阻、先抗阻后有氧）进行分组。

（1）运动总量：当运动总量 <240 min/ 周时，BMI、BF%、FFM%、WC、HbA_{1c}%、HOMA-IR 以及 TNF-α 的改善效应显著优于≥ 240 min/ 周的干预。具体来说，BMI 的最大改善效应量为 -1.02（*P*<0.001），BF% 为 -4.29（*P*<0.001），FFM% 为 3.40（*P*<0.001），WC 为 -3.95（*P*<0.001），HbA_{1c}% 为 -0.98（*P*=0.002），HOMA-IR 为 -0.39（*P*=0.005），TNF-α 为 -2.23（*P*<0.001）。而运动总量≥ 240 min/ 周时，VO_{2max}、TG、TC 以及 Glucose 的改善效应最为显著，其中 VO_{2max} 为 5.13（*P*<0.001），TG 为 -3.07（*P*=0.042），TC 为 -2.27（*P*=0.036），Glucose 为 -1.59（*P*=0.010）。

（2）有氧和抗阻训练先后顺序：当训练顺序为先抗阻后有氧训练时，BMI、BF%、FFM%、WC、VO_{2max}、IL-6 以及 TNF-α 的改善效应较高。具体来说，BMI 为 -0.82（*P*<0.001）、BF% 为 -4.70（*P*<0.001）、FFM% 为 3.38（*P*<0.001）、WC 为 -2.73（*P*<0.001）、VO_{2max} 为 4.08（*P*=0.004）、IL-6 为 -1.85（*P*<0.001）、TNF-α 为 -2.23（*P*<0.001）。而训练顺序为先有氧后抗阻训练时，HbA_{1c}%、HOMA-IR、Glucose 的改善效应

最为显著，其中 HbA$_{1c}$% 为 −0.83（P<0.001），HOMA-IR 为 −2.33（P=0.0025），Glucose 为 −1.90（P=0.038）。详见表 3

2.6　不良事件

本文纳入的 12 项研究均未报道有任何不良事件的发生。这些研究中有可能出现的不良反应类型包括药物相关不良反应（如低血糖、胃肠道不适、皮疹等）和运动相关不良反应（如肌肉酸痛、关节疼痛、运动损伤等）。尽管未发生任何不良反应，但仍需在未来研究中关注和监测这些潜在风险，以确保干预措施的安全性和有效性。

2.7　发表偏倚

BMI 漏斗图中数据点分布相对对称，但在效应量为负值较大的部分数据点偏少，这可能表明存在一定程度表偏倚，见图 2。

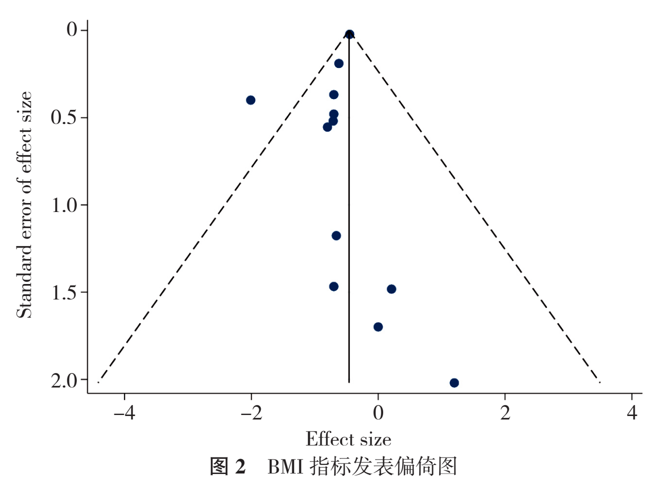


图 2　BMI 指标发表偏倚图

Figure 2　Graph of publication bias for BMI indicators

3　讨论

在超重或肥胖人群中，脂肪、肌肉和肝脏对胰岛素敏感性降低，导致胰腺 β 细胞长期过度分泌胰岛素[30]，最终引发糖尿病[31]，其发病机制包括慢性炎症[32]、脂肪溢出[33]、脂肪因子分泌异常[33]和肠道菌群失调[34]等。近年来，肥胖与 2 型糖尿病呈年轻化趋势，可能与高热量饮食、久坐生活方式及缺乏运动有关。常规运动干预包括有氧运动和抗阻训练。有研究表明，同期有氧与抗阻训练结合可有效降低相关疾病风险[7]。本研究通过系统评价和元分析，首次综合评估同期训练对伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者的影响，发现其显著改善体成分、心肺适应性、脂质代谢、代谢标志物和炎症标志物，尤其在改善体成分和代谢标志物方面表现突出，但效果受训练强度和顺序影响。

3.1　同期训练对伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者身体成分的影响

2 型糖尿病患者的体组成与健康人群存在差异，这与多种疾病的病理发生密切相关。例如，脂肪的区域性分布影响肥胖、代谢综合征和整体健康状况，并在心血管疾病和代谢性疾病的病理生理中起关键作用[35-36]。影响糖尿病患者体组成变化的因素可分为不可控因素（如年龄、种族和性别）和可控因素（如代谢指标、降糖药物治疗和生活方式干预）两类。优化可控因素有助于维持理想的体组成结构，降低肥胖相关的 2 型糖尿病发病率[37]。本研究 Meta 分析结果显示，同期训练可显著降低伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者的 BMI、BF%、WC，并提高 FFM%。同期训练在减少脂肪量和增强肌肉质量方面有双重益处，较单一有氧或抗阻训练更有效。其机制可能为同期训练增强肌肉纤维的募集，促进肌原纤维肥大和肌肉收缩能力，增加肌肉中线粒体的数量和功能，从而提升代谢活性，加速脂肪酸的 β－氧化，提高能量消耗并优化能量利用效率[38]。亚组分析结果显示，当每周训练总量少于 240 min 时，BMI、BF%、FFM% 和 WC 的改善效果尤为显著。这与 ADA 指南建议的每周至少 150min 中等强度体育运动一致[39]。尽管更长时间的运动（如每周至少 5 天，45~90 min/d）可能效果更佳，但单纯增加运动时间并不一定带来更佳的疾病防治效果，主要由于运动的边际效益递减、过度训练的生理风险及心理疲劳等因素[40]。此外，同期训练中的训练顺序对改善身体成分同样具有重要影响。本研究的 Meta 分析结果表明，当训练顺序为先抗阻后有氧时，BMI、BF%、FFM%、WC 的改善效果最显著。这可能是因为抗阻训练在前可有效刺激肌肉增长和提高基础代谢率，随后在有氧训练中增加脂肪消耗[41]。此外，抗阻训练首先使用糖原作为能量来源，随后在有氧训练中由于糖原水平降低，脂肪利用率增强，从而优化能量消耗效率[42]。综上，2 型糖尿病患者的体组成显著不同于健康人群，这与肥胖等多种疾病病理相关。同期训练可显著改善伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者的体成分、代谢和炎症指标，效果受训练总量和顺序影响。未来研究需优化训练方案，以更好地管理伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病。

3.2　同期训练对伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者心肺适能的影响

最大摄氧量不仅是评估心肺功能的重要指标，也是预测全因死亡率和心血管疾病特异性死亡率的独立风险因子[43]，当最大摄氧量低于 17.6 mL·kg^{-1}·min^{-1} 时，全因死亡风险增加 1.93 倍[44-45]。2 型糖尿病患者因胰岛素抵抗、血管内皮功能障碍和微血管病变，其最大摄氧量显著低于健康个体[46]。此外，腹型肥胖引起的腹围增加限制膈肌活动，进一步削弱心肺耐力。本研究结果表明，同期训练显著提高了伴有超重或肥胖的 2 型糖

尿病患者的 VO_{2max}。同期训练的优势在于同时提升心脏泵血效率和肺部通气功能，不仅改善心肺功能，还通过增加全身氧合效率，提高机体整体代谢率。亚组分析结果显示，当每周训练时长超过 240 min 时，VO_{2max} 的改善效应最为显著。Sisson 等[47]针对绝经后妇女探讨运动训练量与心肺耐力关系的研究表明，运动训练量与心肺耐力改善效果呈正比，这与本文研究结果一致。其机制可能涉及心肺功能的适应性增强、心血管系统的改善、肌肉效率的提高、慢性生理变化以及基因表达的变化。此外，抗阻训练在前有氧训练在后的训练顺序对 VO_{2max} 的提升效果更加明显。Cadore 等[48]对 26 名健康老年男性进行了有氧和抗阻训练的不同干预顺序研究，以探讨对心血管和神经肌肉适应性的影响，结果表明，两种顺序干预组的最大摄氧量峰值、功率自行车的最大骑行负荷和乳酸阈强度均有类似增加，但先进行抗阻训练后进行有氧训练的老年受试者在第一通气阈强度上的增加更为明显，且在膝伸肌的 1RM 和肌肉质量提升方面也显著高于先进行有氧训练后进行抗阻训练的受试者。抗阻训练预先消耗肌肉中的糖原储备，使随后的有氧训练更依赖于脂肪作为主要能量来源，从而增加心肺负荷，提高能量消耗和利用率。此外，抗阻训练优先可能通过增强神经肌肉适应性，如提高运动单位的募集和发放率，进一步促进力量和肌肉质量的提升。建议在进行并行训练时优先安排抗阻训练以获得更全面的适应性收益。

3.3 同期训练对 T2DM 超重或肥胖患者血脂和代谢标志物的影响

在 2 型糖尿病超重或肥胖患者中，调整血脂水平及优化代谢标志物是降低心血管疾病风险和控制糖尿病进展的关键措施。本研究 Meta 分析结果显示，同期训练能显著降低 TC、LDL-C 和 TG 并提高 HDL-C 的含量。其原因可能是同期训练不仅增加了能量消耗，还加快了脂质氧化，优化了患者的能量利用效率。此外，同期训练还显著降低了伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者 HbA_{1c}%、Glucose 及 HOMA-IR 的水平，均指示了对血糖控制的积极影响。说明同期训练通过增强肌肉对葡萄糖的摄取和使用，改善了胰岛素敏感性，从而有效调节血糖水平和代谢健康。亚组分析结果显示，当训练总量每周 240 min 以上时，TG、TC、Glucose 的改善效应最为显著；而训练总量低于每周 240 min 时，对 HbA_{1c} 和 HOMA-IR 的改善效应最为显著，其机制可能与大训练量促进肌肉中脂肪酸转运蛋白（如 FAT/CD36）和脂肪酸结合蛋白的活性有关，增强了游离脂肪酸的摄取与利用，进而提高了能量消耗及脂肪氧化率。同时，持续的运动训练还可以提升肝脏低密度脂蛋白受体的表达，优化胆固醇的代谢清除过程[20, 22]。在脂肪组织中，长期运动通过激活 AMP 活化蛋白激酶及过氧化物酶体增殖物激活受体 γ 共激活因子 1α 等关键代谢调节因子，进一步促进脂肪氧化和能量的高效消耗。同时，针对训练顺序的亚组分析结果显示，抗阻训练和有氧训练的先后顺序对脂质代谢的改善效应并无显著型差异，而有氧训练在前抗阻训练在后的训练顺序对糖尿病代谢标志物（HbA_{1c}、HOMA-IR、Glucose）的改善效应最佳，这可能与有氧训练首先消耗大量血糖，为后续抗阻训练中肌肉对葡萄糖需求的增加创造了低糖环境，进而更有效地促进了血糖的利用[23, 26]。

3.4 同期训练对伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者炎症标志物的影响

在伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者中，TNF-α 和 IL-6 等炎症标记物水平异常升高，这一现象与胰岛素抵抗及 β 细胞功能衰退直接相关。研究表明，这些炎症因子不仅在局部脂肪组织和肝脏中调节代谢过程，还通过全身性炎症反应加剧糖代谢异常，推动伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病的病理进程[32]。本研究 Meta 分析结果显示，同期训练后，能显著降低伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者 TNF-α、IL-6 的水平，亚组分析结果显示，当训练总量小于每周 240 min，对 TNF-α 的改善效应最大，这可能是因为小训练量较高强度运动能迅速触发机体的抗炎反应，即使较短的运动时间也足以激活免疫系统，从而显著减少炎症介质 TNF-α 的表达。运动诱导的肌肉抗炎细胞因子 IL-6 产生，能有效抑制 TNF-α 的活性，并在全身范围内发挥抗炎作用。同时，小训练量运动可积极激活抗氧化系统，有助于调节氧化应激反应，减轻由此引起的炎症，进一步降低 TNF-α 的产生。此外，通过减少脂肪组织量或改善其代谢状态，也可显著减少该组织中 TNF-α 的释放。同时，通过先进行抗阻训练，肌肉中的糖原被有效耗尽，使得随后的有氧训练更多地依赖脂肪作为能量来源进行氧化，减少脂肪细胞中的炎症反应，降低脂肪组织产生的炎症标记物[26]。此外，这种训练顺序优化了心肺负荷和肌肉的机械负荷，进一步激活了肌肉纤维中的代谢和抗炎途径，从而全面降低了体内的炎症水平。这不仅帮助减轻了炎症状态，还通过增强机体的能量利用和改善微循环，有效地支持了伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者的综合健康管理，显示出综合运动干预方案在控制伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病及其并发症中的关键作用。

4 总结与展望

本文系统评估了同期训练对伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者的影响，通过元分析揭示其对体成分、心肺适应性、血脂谱、代谢标志物及炎症状态的显著改善。同期训练通过结合有氧运动和抗阻训练的优势，显著降低了 BMI、BF、WC 并提高了 FFM% 及 VO_{2max}。此外，

该训练方法也有效改善了血脂指标，包括 TG、TC、LDL-C 以及 HDL-C，并降低了 HbA_{1c} 和 Glucose。还分析探讨了同期训练在减少系统性炎症反应中的潜力，尤其是对 TNF-α 和 IL-6 的影响，强调了其在综合管理伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病中的重要性。此外，研究还揭示了训练总量和顺序对健康结果的显著影响，提示个性化训练方案的重要性。这些结果为伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者的运动处方提供了更为科学的依据，强调了运动干预在公共卫生中的应用价值。根据本文研究结果，针对伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者，提出了具体的同期训练运动处方：当运动总量 <240 min/ 周 时，BMI、BF%、FFM%、WC、HbA_{1c}%、HOMA-IR 以及 TNF-α 的改善效应显著优于≥ 240 min/ 周的干预，具体来说，这些指标的改善更为明显。而当运动总量≥ 240 min/ 周时，VO_{2max}、TG、TC 以及 Glucose 的改善效应最为显著。另外，当训练顺序为先抗阻后有氧训练时，BMI、BF%、FFM%、WC、VO_{2max}、IL-6 以及 TNF-α 的改善效应较高，而先有氧后抗阻训练时，HbA_{1c}、HOMA-IR、Glucose 的改善效应最为显著，运动强度建议中等强度，须循序渐进。

尽管当前研究取得了积极成果，但仍存在一些限制，如样本多样性不足、研究设计局限以及高异质性等问题。未来的研究应致力于开发更为个性化的训练方案，考虑到个体差异以优化训练效果，并进行长期跟踪研究以评估同期训练的持续影响。同时，通过利用先进的技术和工具，如可穿戴设备和移动健康应用，可以提高训练计划的实施效率和个体化水平。这些努力有望克服现有的不足，优化同期训练的临床应用，从而在公共卫生领域中更好地应用运动干预措施，改善伴有超重或肥胖的 2 型糖尿病患者的健康状况。

作者贡献：卢冬磊负责数据收集整理、选题、文章撰写；冯展鹏、曹立全负责数据收集整理、论文评估；谭思洁、杨风英负责论文思路、框架的把握，对整体文章负责。

本文无利益冲突。

参考文献

[1] MICHAELIDOU M，PAPPACHAN J M，JEEYAVUDEEN M S. Management of diabesity：current concepts［J］. 世界糖尿病杂志：英文版（电子版），2023，14（4）：396-411. DOI：10.4239/wjd.v14.i4.396.

[2] 马香菊，刘飞 . 中医治疗肥胖型 2 型糖尿病的进展分析［J］. 糖尿病新世界，2024，27（3）：194-198. DOI：10.16658/j.cnki.1672-4062.2024.03.194.

[3] NESTI L，PUGLIESE N R，SANTONI L，et al. Distinct effects of type 2 diabetes and obesity on cardiopulmonary performance［J］. Diabetes Obes Metab，2024，26（1）：351-361. DOI：10.1111/dom.15324.

[4] ARSENAULT B J，CARPENTIER A C，POIRIER P，et al. Adiposity，type 2 diabetes and atherosclerotic cardiovascular disease risk：use and abuse of the body mass index［J］. Atherosclerosis，2024，394：117546. DOI：10.1016/j.atherosclerosis.2024.117546.

[5] SAXTON S N，CLARK B J，WITHERS S B，et al. Mechanistic links between obesity，diabetes，and blood pressure：role of perivascular adipose tissue［J］. Physiol Rev，2019，99（4）：1701-1763. DOI：10.1152/physrev.00034.2018.

[6] LINGVAY I，SUMITHRAN P，COHEN R V，et al. Obesity management as a primary treatment goal for type 2 diabetes：time to reframe the conversation［J］. Lancet，2022，399（10322）：394-405. DOI：10.1016/S0140-6736（21）01919-X.

[7] 刘仁凡，吕丽婷，伍怡，等 . 不同强度训练方式对 2 型糖尿病超重或肥胖者体成分及糖代谢影响的 Meta 分析［J］. 中国组织工程研究，2024，28（14）：2274-2281. DOI：10.12307/2024.290.

[8] 杨雪歌，傅力 . 运动、Adropin 与代谢性疾病研究进展［J］. 中国运动医学杂志，2022，41（3）：227-231. DOI：10.16038/j.1000-6710.2022.03.005.

[9] 陈子扬，蒲锐，邓爽，等 . 外泌体对运动介导胰岛素抵抗类疾病的调控作用［J］. 中国组织工程研究，2021，25（25）：4089-4094.

[10] 孙易，丁树哲 . APPL1 与胰岛素抵抗的关系及运动对其调控作用研究进展［J］. 中国运动医学杂志，2020，39（6）：491-498. DOI：10.16038/j.1000-6710.2020.06.013.

[11] SANDSDAL R M，JUHL C R，JENSEN S B K，et al. Combination of exercise and GLP-1 receptor agonist treatment reduces severity of metabolic syndrome，abdominal obesity，and inflammation：a randomized controlled trial［J］. Cardiovasc Diabetol，2023，22（1）：41. DOI：10.1186/s12933-023-01765-z.

[12] CARBONE S，DEL BUONO M G，OZEMEK C，et al. Obesity，risk of diabetes and role of physical activity，exercise training and cardiorespiratory fitness［J］. Prog Cardiovasc Dis，2019，62（4）：327-333. DOI：10.1016/j.pcad.2019.08.004.

[13] CELIK O，YILDIZ B O. Obesity and physical exercise［J］. Minerva Endocrinol，2021，46（2）：131-144. DOI：10.23736/S2724-6507.20.03361-1.

[14] ZAKI S，SHARMA S，VATS H. Effectiveness of concurrent exercise training in people with type 2 diabetes：a systematic review and meta-analysis［J］. Physiother Theory Pract，2023：1-22. DOI：10.1080/09593985.2023.2225717.

[15] HICKSON R C，ROSENKOETTER M A，BROWN M M. Strength training effects on aerobic power and short-term endurance［J］. Med Sci Sports Exerc，1980，12（5）：336-339.

[16] PAGE M J，MOHER D，BOSSUYT P M，et al. PRISMA 2020 explanation and elaboration：updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews［J］. BMJ，2021，372：n160. DOI：10.1136/bmj.n160.

[17] 卢冬磊，谭思洁，杨风英 . 最大脂肪氧化强度运动可改善超重或肥胖人群身体成分、心肺耐力和脂质代谢：一项 Meta 分析［J］. 中国全科医学，2024.［Epub ahead of print］. DOI：10.12114/j.issn.1007-9572.2024.0108.

[18] AMANAT S，FARAROUEI M，DIANATINASAB M. Response：



the effect of 12 weeks aerobic, resistance, and combined exercises on omentin-1 levels and insulin resistance among type 2 diabetic middle-aged women [J]. Diabetes Metab J, 2017, 41 (4): 324-325. DOI: 10.4093/dmj.2017.41.4.324.

[19] ANNIBALINI G, LUCERTINI F, AGOSTINI D, et al. Concurrent aerobic and resistance training has anti-inflammatory effects and increases both plasma and leukocyte levels of IGF-1 in late middle-aged type 2 diabetic patients [J]. Oxid Med Cell Longev, 2017, 2017: 3937842. DOI: 10.1155/2017/3937842.

[20] BALDUCCI S, ZANUSO S, NICOLUCCI A, et al. Effect of an intensive exercise intervention strategy on modifiable cardiovascular risk factors in subjects with type 2 diabetes mellitus: a randomized controlled trial: the Italian Diabetes and Exercise Study (IDES) [J]. Arch Intern Med, 2010, 170 (20): 1794-1803. DOI: 10.1001/archinternmed.2010.380.

[21] BANITALEBI E, KAZEMI A, FARAMARZI M, et al. Effects of sprint interval or combined aerobic and resistance training on myokines in overweight women with type 2 diabetes: a randomized controlled trial [J]. Life Sci, 2019, 217: 101-109. DOI: 10.1016/j.lfs.2018.11.062.

[22] BASSI D, MENDES R G, ARAKELIAN V M, et al. Potential effects on cardiorespiratory and metabolic status after a concurrent strength and endurance training program in diabetes patients - a randomized controlled trial [J]. Sports Med Open, 2015, 2: 31. DOI: 10.1186/s40798-016-0052-1.

[23] KADOGLOU N P, FOTIADIS G, KAPELOUZOU A, et al. The differential anti-inflammatory effects of exercise modalities and their association with early carotid atherosclerosis progression in patients with type 2 diabetes [J]. Diabet Med, 2013, 30 (2): e41-50. DOI: 10.1111/dme.12055.

[24] LEE D H, LEE S H, AN K, et al. Effects of 6 weeks of lifestyle modification including combined exercise program on the risk of metabolic parameters and macrovascular complications in type 2 diabetic patients [J]. Korean J Obes, 2011, 20 (3): 147. DOI: 10.7570/kjo.2011.20.3.147.

[25] LEEHEY D J, COLLINS E, KRAMER H J, et al. Structured exercise in obese diabetic patients with chronic kidney disease: a randomized controlled trial [J]. Am J Nephrol, 2016, 44 (1): 54-62. DOI: 10.1159/000447703.

[26] MOTAHARI RAD M, BIJEH N, ATTARZADEH HOSSEINI S R, et al. The effect of two concurrent exercise modalities on serum concentrations of FGF21, irisin, follistatin, and myostatin in men with type 2 diabetes mellitus [J]. Arch Physiol Biochem, 2023, 129 (2): 424-433. DOI: 10.1080/13813455.2020.1829649.

[27] SAEIDI A, SOLTANI M, DARAEI A, et al. The effects of aerobic-resistance training and broccoli supplementation on plasma dectin-1 and insulin resistance in males with type 2 diabetes [J]. Nutrients, 2021, 13 (9): 3144. DOI: 10.3390/nu13093144.

[28] SILVEIRA-RODRIGUES J G, PIRES W, GOMES P F, et al. Combined exercise training improves specific domains of cognitive functions and metabolic markers in middle-aged and older adults with type 2 diabetes mellitus [J]. Diabetes Res Clin Pract, 2021, 173: 108700. DOI: 10.1016/j.diabres.2021.108700.

[29] VINETTI G, MOZZINI C, DESENZANI P, et al. Supervised exercise training reduces oxidative stress and cardiometabolic risk in adults with type 2 diabetes: a randomized controlled trial [J]. Sci Rep, 2015, 5: 9238. DOI: 10.1038/srep09238.

[30] REAVEN G M. Role of insulin resistance in human disease [J]. Diabetes, 1988, 37 (12): 1595-1607. DOI: 10.2337/diab.37.12.1595.

[31] 李星，袁振芳. 肥胖型2型糖尿病的内科治疗进展[J]. 中华肥胖与代谢病电子杂志，2016，2（3）：133-137. DOI：10.3877//cma.j.issn.2095-9605.2016.03.003.

[32] ROHM T V, MEIER D T, OLEFSKY J M, et al. Inflammation in obesity, diabetes, and related disorders [J]. Immunity, 2022, 55 (1): 31-55. DOI: 10.1016/j.immuni.2021.12.013.

[33] CHADT A, SCHERNECK S, JOOST H G, et al. Molecular links between Obesity and Diabetes: "Diabesity" [M] //FEINGOLD K R, ANAWALT B, BLACKMAN M R, et al. Endotext. South Dartmouth (MA); MDText.com. 2000.

[34] LONGO S, RIZZA S, FEDERICI M. Microbiota-gut-brain axis: relationships among the vagus nerve, gut microbiota, obesity, and diabetes [J]. Acta Diabetol, 2023, 60 (8): 1007-1017. DOI: 10.1007/s00592-023-02088-x.

[35] JAYEDI A, SOLTANI S, MOTLAGH S Z, et al. Anthropometric and adiposity indicators and risk of type 2 diabetes: systematic review and dose-response meta-analysis of cohort studies [J]. BMJ, 2022, 376: e067516. DOI: 10.1136/bmj-2021-067516.

[36] QI Q J, SUN K, RONG Y, et al. Body composition of the upper limb associated with hypertension, hypercholesterolemia, and diabetes [J]. Front Endocrinol, 2022, 13: 985031. DOI: 10.3389/fendo.2022.985031.

[37] 唐颖，龚莉琳，汪志红. 2型糖尿病身体成分的特点及相关影响因素研究进展[J]. 重庆医科大学学报，2020，45（12）：1727-1733. DOI：10.13406/j.cnki.cyxb.002502.

[38] HUANG Y R, DONG X Q, XU L Q, et al. Additional health education and nutrition management cause more weight loss than concurrent training in overweight young females [J]. Complement Ther Clin Pract, 2023, 51: 101721. DOI: 10.1016/j.ctcp.2023.101721.

[39] DE BOER I H, KHUNTI K, SADUSKY T, et al. Diabetes management in chronic kidney disease: a consensus report by the American diabetes association (ADA) and kidney disease: improving global outcomes (KDIGO) [J]. Diabetes Care, 2022, 45 (12): 3075-3090. DOI: 10.2337/dci22-0027.

[40] MALLARDO M, DANIELE A, MUSUMECI G, et al. A narrative review on adipose tissue and overtraining: shedding light on the interplay among adipokines, exercise and overtraining [J]. Int J Mol Sci, 2024, 25 (7): 4089. DOI: 10.3390/ijms25074089.

[41] 王明献，李玉周. 有氧运动和力量训练不同顺序组合对超重大学生体适能的影响[J]. 内蒙古师范大学学报：自然科学汉文版，2014，43（2）：259-264. DOI：10.3969/j.issn.1001-8735.2014.02.027.

[42] MURLASITS Z, KNEFFEL Z, THALIB L. The physiological effects of concurrent strength and endurance training sequence: a systematic review and meta-analysis [J]. J Sports Sci, 2018, 36 (11):

1212-1219. DOI：10.1080/02640414.2017.1364405.
［43］李英，张洁，余红艳，等. 2 型糖尿病合并脂肪肝患者的心肺耐力情况及其影响因素分析［J］. 天津医药，2022，50（12）：1320-1323. DOI：10.11958/20220505.
［44］WOO J，YAU F，LEUNG J，et al. Peak oxygen uptake，six-minute walk distance，six-meter walk speed，and pulse pressure as predictors of seven year all-cause and cardiovascular mortality in community-living older adults［J］. Exp Gerontol，2019，124：110645. DOI：10.1016/j.exger.2019.110645.
［45］CARBONE S，KIM Y，KACHUR S，et al. Peak oxygen consumption achieved at the end of cardiac rehabilitation predicts long-term survival in patients with coronary heart disease［J］. Eur Heart J Qual Care Clin Outcomes，2022，8（3）：361-367. DOI：10.1093/ehjqcco/qcab032.
［46］BLUHM M L，HOEHING K N，NELSON R K，et al. Effect of type-2 diabetes mellitus on cardiac rehabilitation outcomes：a meta-analysis［J］. Arch Phys Med Rehabil，2022，103（10）：2016-2022. DOI：10.1016/j.apmr.2022.01.167.
［47］SISSON S B，KATZMARZYK P T，EARNEST C P，et al. Volume of exercise and fitness nonresponse in sedentary，postmenopausal women［J］. Med Sci Sports Exerc，2009，41（3）：539-545. DOI：10.1249/MSS.0b013e3181896c4e.
［48］CADORE E L，IZQUIERDO M，ALBERTON C L，et al. Strength prior to endurance intra-session exercise sequence optimizes neuromuscular and cardiovascular gains in elderly men［J］. Exp Gerontol，2012，47（2）：164-169. DOI：10.1016/j.exger.2011.11.013.

（收稿日期：2024-05-20；修回日期：2024-07-10）
（本文编辑：赵跃翠）